






Extraction of Geomorphological Landforms Using the TPI Index and MLMSR, CMLSR, and SPSR Algorithms (Case Study: Southern Slopes of the Sahand Mountain Massif)

Mousa Abedini¹ , Aboozar Sadeghi² , Aghil Madadi³ 

1. (Corresponding Author) Department of Physical Geography, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.

Email: Abedini@uma.ac.ir

2. Department of Physical Geography, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.

Email: Aboozarsadeghi@uma.ac.ir

3. Department of Physical Geography, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.

Email: a_madadi@uma.ac.ir

Article Info

Article Type:
Research Article

Article History:

Received:

5 May 2025

Received in revised form:

2 July 2025

Accepted:

1 September 2025

pp.20-36

Keywords:

Landform,
Sahand,
Geomorphology,
Topographic Position Index
(TPI)

ABSTRACT

The present study examines and analyzes various landform types in the southern slopes of the Sahand mountainous massif using the Topographic Position Index (TPI) and MLMSR, CMLSR, and SPSR algorithms. The study area includes the Qaleh Chay, Sufi Chay, Mardagh Chay, Lilan Chay basins, which are sub-basins of Lake Urmia, as well as part of the Qarangu region. The main objective of this research is to extract landforms and compare the efficiency of the algorithms in analyzing the region's topographic features. To conduct the study, a Digital Elevation Model (DEM) with a 30-meter resolution was used, and based on the TPI index, ten types of landforms were identified. The results showed that various landforms, including narrow and deep valleys, plains, hills, upper plateaus, and ridges, are scattered across the region and influenced by factors such as topography, geology, and erosion. In mountainous areas, valleys and elevated drainage systems are the most widespread, whereas plains are concentrated in lower, flatter regions. A comparison of the MLMSR, CMLSR, and SPSR algorithms indicated that each algorithm is more effective in identifying and analyzing specific types of landforms due to its structural and procedural characteristics. The MLMSR algorithm demonstrated higher efficiency in detecting more complex forms, while SPSR performed better in the precise differentiation of pixels. This study, by providing detailed information about the region's landforms and the capabilities of different algorithms, can contribute to sustainable natural resource management, regional planning, geotourism, and the mitigation of natural hazards such as floods.

Cite this article: Abedini, M., Sadeghi, A. and Madadi, A. (2025). Extraction of Geomorphological Landforms Using the TPI Index and MLMSR, CMLSR, and SPSR Algorithms (Case Study: Southern Slopes of the Sahand Mountain Massif), Fars). *Quantitative Geomorphological Research*, 14(3). 20-36.

Doi: [10.22034/gmpj.2025.499686.1542](https://doi.org/10.22034/gmpj.2025.499686.1542)

Extended Abstract

Introduction

Geomorphology, as a fundamental branch of earth sciences, examines surface changes and investigates geomorphological processes. Landforms, as the diverse shapes of the Earth's surface, result from these processes and provide crucial information about geological history, erosion, and environmental changes. The southern slopes of the Sahand Mountain Massif in northwestern Iran represent a region rich in geomorphic diversity due to their unique geographical location and exposure to tectonic, geological, and climatic factors. This area includes the Qaleh Chay, Soufi Chay, Mardagh Chay, and Lilan Chay basins, as well as parts of the Qarangho basin, all of which are sub-basins of Lake Urmia. Precise identification and analysis of these landforms can play a critical role in sustainable natural resource management, regional planning, and mitigating natural hazards such as floods. With advancements in remote sensing technologies and digital elevation models (DEMs), more accurate and rapid analyses of these landforms have become feasible. This study aims to identify, classify, and analyze the landforms of the southern Sahand slopes using the Topographic Position Index (TPI) and three advanced algorithms: MLMSR, CMLSR, and SPSR.

Methodology

The study utilized DEM data with a spatial resolution of 30 meters and the TPI to analyze and classify landforms. The TPI, an effective index in geomorphological studies, evaluates the topographic position of each pixel relative to its neighboring pixels. Positive TPI values indicate elevated areas (e.g., peaks and ridges), while negative values denote lower areas (e.g., valleys). Three algorithms—MLMSR (Multi-Layered Morphological Spatial Representation), CMLSR (Complex Multi-Level Summit Recognition), and SPSR (Single Point Summit Recognition)—were employed to process DEM data and extract landforms. Each algorithm applies different

methods for analyzing elevation data to identify and classify landforms. The research process involved acquiring DEM data, calculating the TPI, applying algorithms, generating landform maps, and analyzing the results. The algorithms were evaluated for their performance in areas with varying characteristics, such as mountainous and flat regions.

Results and discussion

The analysis revealed that the southern Sahand slopes encompass ten primary landform types, each with distinct characteristics. Narrow valleys and channels were predominantly observed in steep, mountainous areas in the northern and eastern parts of the region, while plains and flatlands were concentrated in the southern and lower sections. Ridges and elevated plateaus were prominent in higher altitudes, reflecting the influence of tectonic and erosional processes on landform development. A comparison of algorithms showed that MLMSR excelled in identifying peaks and ridges in mountainous areas. SPSR was more effective for precise classification of flat and plain areas, while CMLSR demonstrated satisfactory performance in recognizing complex landforms and conducting multi-scale analyses. The generated maps provided comprehensive information on the distribution and diversity of landforms, serving as a foundation for further studies.

Conclusion

This study demonstrated that the TPI and the applied algorithms are powerful tools for geomorphological analysis of complex regions such as the southern Sahand slopes. The distribution of landforms in this area is influenced by factors such as slope, aspect, elevation, and lithology. Mountainous areas exhibited greater landform diversity due to tectonic and erosional activities, whereas plains were shaped by depositional processes. The findings provide valuable insights for natural resource management, hazard mitigation, and sustainable development. Incorporating higher-resolution data and combining TPI with

other methodologies can enhance the precision of future analyses. This research offers a robust framework for landform classification and analysis and can be applied to similar regions worldwide.

Funding

There is no funding support.

Authors' Contribution

Authors contributed equally to the conceptualization and writing of the article. All of the authors approved the content of the manuscript and agreed on all aspects of the work declaration of competing interest none.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

Acknowledgments

We are grateful to all the scientific consultants of this paper.

آشکارسازی لندفرم‌های ژئومورفولوژی با استفاده از شاخص TPI و الگوریتم‌های MLMSR، CMLSR و SPSR (مطالعه موردی: دامنه جنوبی توده کوهستان سهند)

موسی عابدینی^۱✉، ابوذری صادقی^۲، عقیل مددی^۳

- ۱- نویسنده مسئول، گروه جغرافیا طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. رایانامه: Abedini@uma.ac.ir
- ۲- گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. رایانامه: Aboozarsadeghi@uma.ac.ir
- ۳- گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. رایانامه: a_madadi@uma.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	لندفرم‌ها بیانگر فرآیندهای تأثیرگذار بر عوارض سطح زمین در گذشته و حال هستند و اطلاعات مهمی در مورد ویژگی‌ها و پتانسیل‌های زمین فراهم می‌کنند پژوهش حاضر با هدف استخراج و تحلیل لندفرم‌های ژئومورفولوژیکی دامنه جنوبی توده کوهستان سهند، از شاخص موقعیت توپوگرافی (TPI) و سه الگوریتم پیشرفته MLMSR، CMLSR و SPSR بهره گرفته است. منطقه مورد مطالعه شامل حوضه‌های قلعه چای، صوفی چای، مردق چای، لیلان چای و بخشی از قرقنو است که به جز حوضه قرقنو بقیه حوضه‌ها از زیرحوضه‌های دریاچه ارومیه محسوب می‌شوند. در این مطالعه، مدل رقومی ارتفاع (DEM) با قدرت تفکیک ۳۰ متر برای تحلیل ویژگی‌های توپوگرافی منطقه به کار گرفته شد و بر این اساس، ۱۰ نوع لندفرم شناسایی گردید. نتایج نشان داد که توزیع لندفرم‌ها در منطقه متأثر از عوامل زمین‌شناسی، فرسایشی و تکتونیکی است. در مناطق کوهستانی، دره‌های باریک و زهکش‌های مرتفع گسترده‌تری دارند، در حالی که در مناطق هموارتر، دشت‌ها و تپه‌ها غالب هستند. مقایسه روش‌های مورد استفاده نشان داد که الگوریتم MLMSR در تشخیص اشکال پیچیده مانند دامنه‌های شیب‌دار و آبراهه‌ها کارایی بهتری دارد، در حالی که CMLSR در شناسایی نواحی مرتفع، قله‌ها و خط‌الرأس‌ها دقت بالاتری نشان داد. همچنین، SPSR در تفکیک مناطق مرتفع و دشت‌ها عملکرد مناسبی داشته، اما در شناسایی جزئیات شیب‌ها ضعیف‌تر از سایر الگوریتم‌ها بوده است. به‌طور کلی، این مطالعه نشان داد که ترکیب شاخص TPI با الگوریتم‌های MLMSR، CMLSR و SPSR می‌تواند رویکردی کارآمد برای استخراج و تحلیل لندفرم‌ها ارائه دهد و از این داده‌ها می‌توان برای مدیریت منابع طبیعی، برنامه‌ریزی منطقه‌ای، ژئوتوریسم و کاهش مخاطرات طبیعی استفاده کرد.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۱۵	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۴/۱۱	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۰۸	
صص. ۲۰-۳۶	
واژگان کلیدی: زمین‌لغزش، مارگون، یادگیری ماشینی، ماشین بردار پشتیبان، خطی تعمیم‌یافته، جنگل تصادفی.	

استناد: عابدینی، موسی، صادقی، ابوذری و مددی، عقیل. (۱۴۰۴). آشکارسازی لندفرم‌های ژئومورفولوژی با استفاده از شاخص TPI و الگوریتم‌های MLMSR، CMLSR و SPSR (مطالعه موردی: دامنه جنوبی توده کوهستان سهند). پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، ۳(۱)، ۲۰-۳۶.

Doi: [10.22034/gmpj.2025.499686.1542](https://doi.org/10.22034/gmpj.2025.499686.1542)

مقدمه

ژئومورفولوژی یک نظام علمی بین رشته ای پویا در صدد شناخت و مشخص کردن رابطه علت و معلولی تغییرات سطح لیتوسفر زمین است. در این راستا روش پژوهش‌های ژئومورفولوژیکی با پیشرفت‌های علمی شگرف در فنون و روش‌شناسی علوم مرتبط به لحاظ، نوع، سرعت، دقت اصولی‌تر و دقیق‌تر شده است (عابدینی، ۱۳۸۵). لندفرم‌ها بیانگر فرآیندهای تأثیرگذار بر عوارض سطح زمین در گذشته و حال هستند و اطلاعات مهمی در مورد ویژگی‌ها و پتانسیل‌های زمین فراهم می‌کنند (اتزل مولر و همکاران، ۲۰۰۱). شکل زمین همچون لندفرم‌ها، در جریان سطوح آبی، انتقال رسوبات، تولید خاک و تعیین اقلیم در مقیاس‌های محلی و منطقه‌ای اثر می‌گذارد، علاوه بر این پدیده‌های طبیعی مثل پوشش گیاهی، مستقیماً توسط الگوی لندفرم‌ها و موقعیت نسبی آن‌ها در میان چشم‌اندازها متأثر هستند (بلاشکه و اشتروبل، ۲۰۰۱). مطالعات ژئومورفیک، امکان شناخت عمیق‌تری از محیط طبیعی را فراهم می‌کند. (مارتینز و همکاران، ۲۰۰۶). شناسایی و طبقه‌بندی لندفرم‌ها از مهم‌ترین اهداف و از کارهای پایه‌ای در تهیه نقشه‌های ژئومورفولوژی به شمار می‌رود (شایان و همکاران، ۲۰۱۲). نقشه‌برداری و اندازه‌گیری تغییرات ژئومورفولوژیکی ابزار ارزشمند برای بسیاری از کاربردهای مربوط به فرسایش و توسعه چشم‌انداز است. لذا ارزیابی میزان و نرخ تغییرات ژئومورفولوژیکی به دلیل کمبود داده‌های میدانی و اندازه‌گیری کمی می‌تواند چالش برانگیز باشد (آندرس و همکاران، ۲۰۱۳). با این حال، تحولات در فناوری ارتفاع‌سنجی هوایی مانند سفینه‌فضایی و (اسمیت و همکاران، ۲۰۰۸) اسکنر لیزر هوایی (لیو، ۲۰۰۸) ترویج تولید مدل‌های ارتفاع دیجیتال چند منظوره یا مدل‌های زمین که به طور بالقوه می‌توانند به عنوان منبع برای تجزیه و تحلیل و اندازه‌گیری تغییر ژئومورفولوژیکی مورد استفاده قرار گیرد (میتاسووا و همکاران، ۲۰۰۹ و ونتورا و همکاران، ۲۰۱۰). داده‌های سنجش از دوری به عنوان یک منبع اصلی برای مطالعات آشکارسازی تغییرات کاربرد دارند، چرا که تناوب زمانی بالا، فرمت دیجیتالی مناسب برای انجام دادن محاسبات، ایجاد یک دید اجمالی و انتخاب گسترده از دقت‌های طیفی و مکانی باعث این امر شده است. اهداف اصلی آشکارسازی تغییرات در تصاویر سنجش از دوری، شامل مشخص کردن موقعیت هندسی، نوع تغییرات، کیفیت تغییرات و ارزیابی صحت نتایج آشکارسازی تغییرات هستند (کرم و همکاران، ۱۳۹۶). نگاشت شکل زمین دیجیتال فرایندی است که اطلاعات شکل زمین را از داده‌های دیجیتال مانند مدل‌های رقومی ارتفاع (DEM)، تصاویر ماهواره‌ای و عکس‌های هوایی استخراج می‌کند (کامارگو و همکاران، ۲۰۱۱). با توجه به افزایش مداوم تفکیک مکانی، جزئیات زیادی ممکن است در داده‌ها نمایش داده شود (لانگ، ۲۰۰۸)، که منجر به نویز در مقیاس شکل زمین می‌شود. بنابراین، محققان شروع به تفکر در مورد تعریف مجدد واحد مکانی پایه برای مدل‌سازی شکل زمین از سلول‌ها به بخش‌ها (یا اشیا)، به ویژه برای مطالعات مبتنی بر DEM کردند (رومستاد و اتزلمولر، ۲۰۱۱). با فرض اینکه اشکال زمین را می‌توان با بخش‌هایی به عنوان مجموعه‌ای از سلول‌های مجاور با مقادیر مشابه مرتبط دانست، تحلیل تصویر مبتنی بر شی (OBIA) رویکرد ارزشمندی برای نگاشت آن‌ها می‌شود (دراگوت و آیسانک، ۲۰۱۱). به طور کلی، OBIA شامل دو مرحله است: تقسیم‌بندی و طبقه‌بندی. الگوریتم پرکاربردی برای استخراج بخش‌های همگن از صحنه‌های ورودی، تقسیم‌بندی چند مقیاسی (MRS) است (باتز، ۲۰۰۰ و بنز و همکاران، ۲۰۰۳). بخش‌های حاصل واحدهای پردازش واقع‌گرایانه‌تری نسبت به سلول‌ها ارائه می‌دهند و می‌توانند در یک ساختار چند مقیاسی ایجاد شوند. پس از مشخص شدن مرزهای بخش‌ها، قوانین طبقه‌بندی برای نگاشت هر بخش به مفهوم شکل زمینی که بیشترین شباهت را با آن دارد اعمال می‌شود (مینار و ایوانز، ۲۰۰۷ و مک میلان و همکاران، ۲۰۰۳). با ظهور و توسعه داده‌های لیدار هوایی در سال‌های اخیر، نیاز به بررسی پتانسیل محصولات لیدار هوایی و معیارهای توپوگرافی مشتق شده مانند مدل رقومی ارتفاع (DEM) و شاخص موقعیت توپوگرافی (TPI) در طبقه‌بندی و نقشه‌برداری پوشش زمین و کاربری زمین شهری وجود دارد. لیدار هوایی یک تکنیک کاوش و اسکن لیزری برای کاربردهای باتی‌متری و توپوگرافی

است (یان و همکاران، ۲۰۱۴). این تکنیک پالس‌های نور لیزر را با استفاده از یک آینه اسکنر به سمت زمین منتقل می‌کند. مقداری از این انرژی به سمت هواپیما پراکنده شده و توسط واحد گیرنده ثبت می‌شود. سیستم موقعیت‌یابی جهانی داخلی و واحد اندازه‌گیری اینرسیال، موقعیت X ، Y و ارتفاع Z را در لحظه ارسال و دریافت پالس لیزر مستند می‌کنند. از این رو، داده‌های لیدار هوایی سوابق سه‌بعدی از ویژگی‌های سطح زمین را ارائه می‌دهند. با استفاده از ابری از اندازه‌گیری‌های برد لیزر برای محاسبه مختصات سه‌بعدی یک منطقه بررسی، می‌توان DEM را به طور موثر از داده‌های لیدار هوایی تولید کرد (شارما و همکاران، ۲۰۲۰ و استولار و همکاران، ۲۰۲۰). علاوه بر این DEM را می‌توان برای استخراج ویژگی‌های توپوگرافی از جمله شاخص موقعیت توپوگرافی با تجزیه و تحلیل تغییر مقادیر ارتفاع در پنجره اندازه هم‌سایگی استفاده کرد TPI. تفاوت ارتفاع بین یک سلول خاص و تمام سلول‌های موجود در یک پنجره هم‌سایگی را نشان می‌دهد (ویس، ۲۰۰۱). مقدار مثبت TPI نشان می‌دهد که سلول بالاتر از محیط اطراف آن است، در حالی که مقدار منفی نشان می‌دهد که پایین‌تر از محیط اطراف آن است. مقادیر TPI نزدیک به صفر نشان دهنده مناطق مسطحی است که شیب در آن نزدیک به صفر یا مناطق شیب متوسط است. بنابراین، TPI ارتفاع هر پیکسل را در یک مدل رقمی ارتفاع با میانگین ارتفاع هم‌سایگی مقایسه می‌کند و کلاس موقعیت شکل زمین هر پیکسل را تعریف می‌کند. می‌توان از آن برای مشخص کردن اشکال زمین مانند دره‌ها، دشت‌ها و خط‌الراس‌ها با دسته‌های پوشش زمین مرتبط استفاده کرد. دوتا و همکاران (۲۰۲۴) به طبقه‌بندی منطقه تپه‌های آجودیا واقع در فلات چوتانگپور با استفاده از شاخص موقعیت توپوگرافی (TPI) و بررسی ارتباط آن با کاربری و پوشش زمین (LULC) پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که در میان تمامی اشکال زمین، پهنه دره‌های وسیع به‌عنوان شکل زمین غالب شناسایی شده است که بیشترین کلاس‌های LULC در این منطقه مشاهده می‌شود و تأثیر قابل‌توجهی بر کاربری و پوشش زمین در کل ناحیه دارد. گوپتا و دبکشیت (۲۰۲۴) به ویژگی‌های تأثیر زمین‌ریختی تأثیر بر سیلاب و جریان آب در آسام، واقع در شمال شرقی هند، پرداختند. در این مطالعه با استفاده از شاخص موقعیت توپوگرافی (TPI) و روش ژئومورفون (ACL) به طبقه‌بندی زمین‌ریخت‌های آسام و بررسی ارتباط آن با شیب، زمین‌شناسی، خاک، کاربری زمین و سیلاب پرداختند. نتایج نشان داد مناطق مسطح و شیب‌های ملایم بیشترین مساحت را پوشش می‌دهند و دره‌ها کلاس زمین‌ریختی غالب هستند که بیشتر در مناطق مرکزی و دره باراک قرار دارند. حدود ۳۸/۰۸ درصد مناطق غرقاب‌شده در دره‌های وسیع و ۳۱ درصد در زمین‌های مسطح قرار دارند. این پژوهش برای برنامه‌ریزی زمین، مدیریت منابع طبیعی و کاهش خطر بلایا مفید است. والکانو و همکاران (۲۰۲۴) به مرور، برجسته‌سازی کاربرد فناوری اطلاعات جغرافیایی در شناسایی و نقشه‌برداری از ویژگی‌های جغرافیایی و انجام تحقیقات در زمینه تحلیل کمی زمین‌ریخت‌شناسی چشم‌اندازها در مناطق تکتونیکی فعال پرداختند. گام اولیه در شناسایی اشکال زمین اولیه یک منطقه شامل طبقه‌بندی خودکار زمین با استفاده از روش شاخص موقعیت توپوگرافی (TPI) بود. نرم‌افزارها و ابزارهای سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) نیز می‌توانند در شناسایی، نقشه‌برداری و تحلیل اشکال زمین خاص، از جمله سطوح پلانا سیون، تراس‌های رودخانه‌ای و نقاط شکست (کینک‌پوینت‌ها) کمک کنند. توزیع مکانی این اشکال زمین، همراه با مقادیر شاخص‌های مورفوتکتونیکی منفرد یا مرکب که به راحتی با استفاده از تکنیک‌های GIS محاسبه می‌شوند، می‌تواند ارزیابی فعالیت تکتونیکی نسبی را تسهیل کند.

نگهبان و مکرم (۱۴۰۳) در مطالعه‌ای به بررسی تأثیر اشکال زمین بر کاربری اراضی و سیلاب در استان بوشهر پرداختند. با استفاده از شاخص موقعیت زمین‌شناختی (TPI) در مقیاس‌های مختلف (۱۰ تا ۶۰ متر)، نقشه‌های اشکال زمین تهیه و دسته‌بندی کردند. اشکال زمین شامل دره‌ها، دشت‌ها، دامنه‌ها، خط‌الرأس‌ها و قله‌ها بود. نتایج نشان داد که با افزایش مقیاس، شکل اصلی زمین محو شده و درصد مساحت دره‌های باریک و زهکش‌ها کاهش می‌یابد، اما خط‌الرأس‌ها و قله‌ها افزایش پیدا می‌کنند. شکاری بادی و همکاران (۱۴۰۲) در تحقیقی با هدف طبقه‌بندی خودکار لندفرم‌های دامنه‌های شمال شرقی ارتفاعات کرکس کوه در منطقه نطنز و کاشان انجام دادند. از دو مدل مبتنی بر مدل رقمی

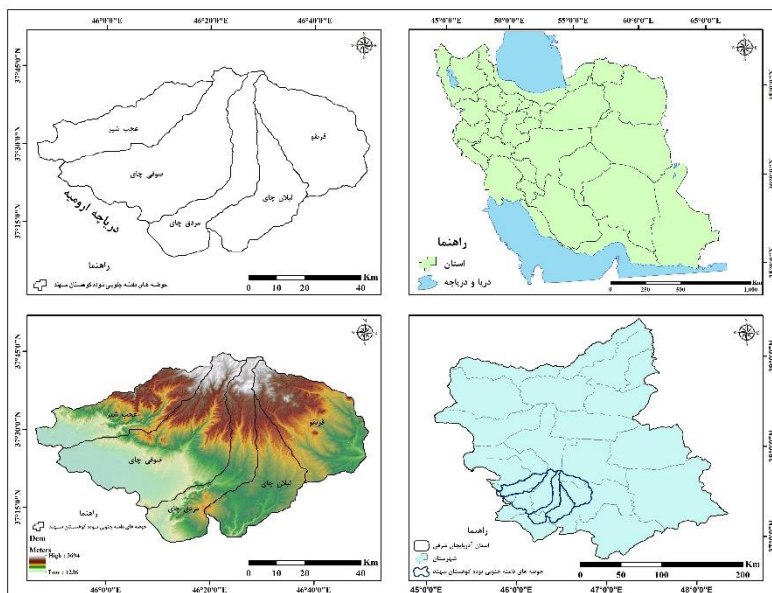
ارتفاعی (DEM)، یعنی ویژگی‌های زمین (TA) و شاخص موقعیت توپوگرافی (TPI)، برای شنا سایی لندفرم‌ها استفاده کردند. در مدل TA لندفرم‌ها به پنج کلاس (قله، شانه دامنه، پشت دامنه، پای دامنه و پنجه دامنه) و در مدل TPI به شش کلاس (ستیخ، شیب‌های بالایی، میانی، پایینی، مسطح و دره‌ها) دسته‌بندی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که در مدل TA، شانه دامنه با ۱۸۱۰ کیلومتر مربع (۳۸٪ مساحت) و در مدل TPI، دره‌ها با ۱۸۷۲ کیلومتر مربع (۴۰٪ مساحت)، به‌عنوان لندفرم‌های غالب منطقه شناسایی شد. استفاده از چندین ورودی در مدل TA و تنوع طبقه‌بندی در مدل TPI از مزایای این روش‌هاست. گنجلی و همکاران (۱۴۰۱) در پژوهشی به بررسی تغییرات شوری خاک در لندفرم‌های بیابانی شمال استان اصفهان بین سال‌های ۱۹۸۷ تا ۲۰۲۰ با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۵ و ۸ پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد شوری خاک از مناطق کوهستانی به مناطق پست افزایش می‌یابد. لندفرم‌های دشت‌های هموار (پالیاها و کفه‌های رسی) بیشترین شوری و کوه‌ها کمترین شوری را دارند. شوری خاک با افزایش ارتفاع و شیب کاهش می‌یابد، اما این کاهش تا ارتفاع ۱۴۰۰ متر و شیب ۱۵ درجه بیشتر محسوس است.

عابدینی و همکاران (۱۴۰۲) به شناسایی لندفرم‌های حوزه آبریز سجاورد پرداختند. برای شناسایی لندفرم‌ها از مطالعات برداشت‌های میدانی و نرم افزار Google Earth و نقشه توپوگرافی و تجزیه مولفه‌های اصلی با تصاویر لندست استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد پهنه‌های پوشش گیاهی و دشت آبرفتی به ترتیب ۴۷/۱۵۹ و ۵۷/۲۶ درصد افزایش مساحت و در مقابل کوه‌ها و تپه‌ها، پادگانه‌های آبرفتی، مخروط افکنه‌ها و آبرفت‌های جدید با کاهش مساحت مواجه بوده‌اند و همینطور نتایج الگوریتم MNF نشان داد بیشترین شدت و سرعت تغییرات مربوط به دشت‌های آبرفتی با مساحت ۹۸۹۲/۴۵ و کوه‌ها و تپه‌ها ۹۴۸۱/۱۳ هکتار و کمترین سرعت تغییرات مربوط به پادگانه‌های آبرفتی با میزان ۱۰/۳۶ هکتار است. در این پژوهش با استفاده از شاخص TPI و الگوریتم‌های MLMSR، CMLSR و SPSR به استخراج لندفرم‌های دامنه جنوبی توده کوهستان سهند که شامل حوضه‌های قلعه چای، صوفی چای، مردق چای، لیلان چای که همه این حوضه زیر حوضه‌های دریاچه ارومیه هستند بود و بخشی از حوضه قرنقو را شامل می‌شد. هدف از این پژوهش مقایسه استخراج لندفرم‌ها بر اساس شاخص و الگوریتم‌های مورد استفاده بوده است. در این پژوهش، رویکردی نوین برای استخراج لندفرم‌های دامنه جنوبی توده کوهستان سهند ارائه شده است که بر ترکیب شاخص TPI با سه الگوریتم پیشرفته MLMSR، CLMSR و SPSR مبتنی است. برخلاف روش‌های سنتی که عمدتاً بر تحلیل‌های عددی و مدل‌های کلاسیک مبتنی هستند، این تحقیق با استفاده از MLMSR (Multi-Level Morphometric Segmentation and Recognition) and CLMSR (Contextual Landform Morphometric Segmentation and Recognition) و SPSR (Scale-Progressive Segmentation and Recognition) رویکردی چند سطحی، مقیاس‌پذیر و وابسته به زمینه را برای استخراج و تفکیک لندفرم‌ها به کار گرفته است. این ترکیب نوآورانه باعث افزایش دقت در شناسایی اشکال ژئومورفولوژیکی شده و امکان تحلیل جزئیات ریزمقیاس و الگوهای پیچیده توپوگرافی را فراهم می‌کند. استفاده از این سه الگوریتم، که در سایر مطالعات به صورت جداگانه بررسی شده‌اند، در کنار شاخص TPI به‌عنوان یک روش ترکیبی، موجب بهینه‌سازی فرایند طبقه‌بندی و استخراج لندفرم‌ها شده و دقت نتایج را نسبت به روش‌های مرسوم بهبود بخشیده است.

محدوده مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه در این پژوهش حوضه‌های دامنه جنوبی توده کوهستان سهند است. حوضه قلعه چای که از سهند سرچشمه گرفته و در نهایت وارد حوضه دریاچه ارومیه می‌شود. حوضه صوفی چای که سد علویان نیز بر روی این حوضه احداث شده است از شهرستان‌های مراغه و بناب عبور کرده تا در نهایت وارد حوضه دریاچه ارومیه می‌شود. حوضه آبخیز مردق چای پس از سرچشمه گرفتن از کوهستان سهند از شرق شهرستان مراغه عبور کرده سپس وارد شهرستان ملکان

شده و در نهایت وارد حوضه دریاچه ارومیه می‌شود. حوضه لیلان چای نیز وارد رودخانه زربینه رود می‌شود و بخشی از حوضه قرنقو که در قسمت جنوبی کوهستان سهپند قرار گرفته است محدود به مطالعه در این پژوهش هستند. میانگین ارتفاعی این حوضه‌ها برابر با ۱۸۷۵ متر، بالاترین نقطه ارتفاعی ۳۹۶۴ و کم‌ترین نقطه ارتفاعی ۱۲۳۶ متر است (DEM SRTM 30m). مساحت کل حوضه‌های مورد مطالعه برابر با ۳۸۲۱/۴۱ کیلومتر مربع بوده است. که در شکل (۱) موقعیت جغرافیایی حوضه‌های مورد مطالعه و در شکل (۲) وضعیت توپوگرافی این حوضه‌ها نمایش داده شده است.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی حوضه‌های دامنه جنوبی توده کوهستان سهپند



شکل ۲. (a) مدل ارتفاعی، (b) مدل سایه روشن، (c) شیب به درجه و (d) جهت شیب حوضه‌های دامنه جنوبی توده کوهستان سهپند

روش تحقیق

داده‌های مورد استفاده

در این پژوهش، به منظور استخراج و طبقه‌بندی لندفرم‌های دامنه جنوبی توده کوهستان سهند، از مدل ارتفاع رقومی (DEM) با دقت مناسب استفاده شده است. این داده‌ها به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین ورودی‌های تحلیل ژئومورفولوژیکی، امکان محاسبه شاخص‌های توپوگرافی نظیر شاخص موقعیت توپوگرافی (TPI) و سایر ویژگی‌های مورفومتریک را فراهم می‌کند. علاوه بر این، از روش‌های پردازش مکانی و فیلترینگ متناسب با مقیاس مطالعه برای بهینه‌سازی داده‌های ارتفاعی بهره گرفته شده است. ترکیب مدل ارتفاع رقومی با الگوریتم‌های MLMSR، CLMSR و SPSR به‌عنوان یک رویکرد تحلیلی پیشرفته، دقت در شناسایی و تفکیک لندفرم‌ها را افزایش داده و امکان بررسی تغییرات ارتفاعی و ساختارهای ژئومورفولوژیکی منطقه را با دقت بالاتری فراهم کرده است.

شاخص موقعیت توپوگرافی (TPI) برای طبقه‌بندی لندفرم

مفهوم کلی و کاربرد شاخص موقعیت توپوگرافی این است که به‌صورت دقیق و غیر توصیفی مرز لندفرم‌هایی مانند: ارتفاعات، شیب تند، مناطق مسطح، دره و غیره را با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی به‌صورت اتوماتیک و سریع، تعریف و تعیین نماید (ملکی و همکاران، ۱۳۹۵). در پژوهش حاضر به منظور تهیه نقشه لندفرم‌های حوضه‌های دامنه جنوبی توده کوهستان سهند از شاخص موقعیت توپوگرافی (TPI) استفاده شد. این شاخص طبق رابطه (۱) مقایسه ارتفاع هر سلول در یک مدل رقومی ارتفاع با میانگین ارتفاع سلول‌های همسایه می‌باشد. در نهایت ارتفاع میانگین از مقدار ارتفاع در مرکز کم می‌شود (ویز، ۲۰۰۱؛ جنز، ۲۰۰۶).

$$TPI_i = Z_0 - \sum_{n-1} Z_n/n \quad \text{رابطه ۱}$$

در این رابطه، Z_0 ارتفاع نقطه مدل تحت ارزیابی، Z_n ارتفاع از شبکه و n تعداد کل نقاط اطراف در نظر گرفته شده در ارزیابی است. شاخص موقعیت توپوگرافی، ارزش هر پیکسل در DEM را با ارزش پیکسل مشخص اطراف آن مقایسه می‌کند. مقادیر مثبت TPI نشان دهنده مناطقی است که بالاتر از نقاط اطراف قرار گرفته (تپه‌ها) و مقادیر منفی TPI نشان دهنده مناطقی است که پایین‌تر از اطرافشان هستند (دره‌ها). مقادیر صفر و نزدیک صفر نیز نشان دهنده مناطق مسطح (جایی که شیب نزدیک صفر است) یا مناطقی با شیب ثابت هستند (مکرم و همکاران، ۱۳۹۴). بر اساس مقادیر TPI یک طبقه‌بندی برای لندفرم صورت گرفته است که در جدول (۱) شاخص موقعیت توپوگرافی در حوضه‌ها شناسایی شد.

جدول ۱. طبقه‌بندی انواع لندفرم‌ها بر اساس شاخص موقعیت توپوگرافی (TPI)، (ویز، ۲۰۰۱؛ جنز، ۲۰۰۶)

TPI مقادیر	نوع لندفرم	ردیف
$TPI \leq -1$	دره‌های باریک، آبراه‌ها	۱
$-1 < TPI < 1$	زهکش‌های شیب‌های میانی، دره‌های کم عمق	۲
$TPI \geq 1$	زهکش‌های مناطق مرتفع	۳
$TPI \leq 1$	شکل U دره‌های	۴
$-1 < TPI < 1, Sole \leq 5^\circ$	دشت	۵
$-1 < TPI < 1, Sole > 5^\circ$	دشت‌سر	۶
$TPI \geq -1$	فلات‌های بالایی (سطوح مسطح واقع بر ارتفاعات)	۷
$TPI \leq -1$	خط الراس‌های مرتفع	۸
$TPI < 1 > -1$	تپه	۹
$TPI \geq 1$	قله کوه، یال‌های مرتفع	۱۰

الگوریتم میانگین چند سطحی (MLMSR)

در این الگوریتم پنجره متحرک با ابعاد فرد در فرد در نظر گرفته شده و با توجه به ابعاد پنجره متحرک، تعداد سطوح (L) با استفاده از رابطه ۲ محاسبه شد. نحوه سطح‌بندی و پیکربندی پنجره متحرک در این الگوریتم در شکل ۳ نشان داده شده است.

mw _(r,c) = 3 × 3		
L ₁	L ₁	L ₁
L ₁	C	L ₁
L ₁	L ₁	L ₁

mw _(r,c) = 5 × 5				
L ₂	L ₂	L ₂	L ₂	L ₂
L ₂	L ₁	L ₁	L ₁	L ₂
L ₂	L ₁	C	L ₁	L ₂
L ₂	L ₁	L ₁	L ₁	L ₂
L ₂	L ₂	L ₂	L ₂	L ₂

mw _(r,c) = 7 × 7						
L ₃	L ₃	L ₃	L ₃	L ₃	L ₃	L ₃
L ₃	L ₂	L ₂	L ₂	L ₂	L ₂	L ₃
L ₃	L ₂	L ₁	L ₁	L ₁	L ₂	L ₃
L ₃	L ₂	L ₁	C	L ₁	L ₂	L ₃
L ₃	L ₂	L ₁	L ₁	L ₁	L ₂	L ₃
L ₃	L ₂	L ₂	L ₂	L ₂	L ₂	L ₃
L ₃	L ₃	L ₃	L ₃	L ₃	L ₃	L ₃

شکل ۳. نحوه سطح‌بندی و توزیع پیکسل‌های هر سطح در الگوریتم میانگین چند سطحی (MLMSR)

در این رابطه؛ L تعداد سطوح بر اساس ابعاد پنجره متحرک mw(r,c) است. برای محاسبه تعداد سطوح از رابطه (mw(r,c)-1)/2 استفاده شد که متناسب با اندازه پنجره متحرک محاسبه می‌شود. سه شرط در این رابطه وجود دارد یکی فرد در فرد بودن ابعاد پنجره متحرک و دیگر آنکه اندازه سطر و ستونی پنجره متحرک با هم برابر بوده (مربعی بودن پنجره متحرک و داشتن مرکز هندسی) و دیگری حداقل اندازه سطر و ستونی پنجره متحرک بزرگتر و یا مساوی ۳ باشد. PL_i پیکسل‌هایی که در سطح L قرار گرفته و با ایندکس -i نامگذاری شده‌اند. با توجه به توضیحات فوق متوسط ارزش پیکسلی (Pixel Value Z) هر سطح از طریق رابطه $(\sum_{i=1}^L PL_i) / L_i$ به دست آمد به طوری که تعداد پیکسل‌هایی که در سطح -i قرار گرفته‌اند یا L_i از رابطه $i \times 8$ به دست می‌آید. حال اگر متوسط ارزش پیکسلی هر سطح از متوسط ارزش پیکسلی سطح بعد از خود بیشتر باشد به مقدار m یک واحد اضافه خواهد شد و کل حالات محتمل در هر پنجره متحرک یا n برابر با تعداد سطوح یا L است.

$$mw_{(r,c)} = \begin{cases} L = \frac{(mw_{(r,c)} - 1)}{2} \mid (r \bmod c) \neq 0 ; r = c ; (r, c) \geq 3 & \text{رابطه ۲} \\ PL_i \mid i \in \mathbb{Z} ; i \geq 1 \\ If = \left(\frac{\sum_{i=1}^L PL_i}{|L_i|} \right) > \left(\frac{\sum_{i=2}^L PL_{i+1}}{|L_{i+1}|} \right) \Rightarrow m+ = 1 \\ n = L \end{cases}$$

الگوریتم تشخیص چند سطحی پیچیده (CLMSR)

در این نوع الگوریتم که تا حدودی به الگوریتم (MLMSR) شباهت دارد، تعداد سطوح بر اساس ابعاد پنجره متحرک تعیین می‌گردد که از L₁ تا L_i متناسب با اندازه پنجره متحرک تغییر می‌کند. شکل ۴ نحوه سطح‌بندی و توزیع پیکسل‌های هر سطح در این الگوریتم را نشان می‌دهد.

$mw_{(r,c)} = 3 \times 3$	$mw_{(r,c)} = 5 \times 5$	$mw_{(r,c)} = 7 \times 7$																																																																																			
<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>L_1P_1</td><td>L_1P_2</td><td>L_1P_3</td></tr> <tr><td>L_1P_4</td><td style="background-color: #e0e0e0;">C</td><td>L_1P_5</td></tr> <tr><td>L_1P_6</td><td>L_1P_7</td><td>L_1P_8</td></tr> </table>	L_1P_1	L_1P_2	L_1P_3	L_1P_4	C	L_1P_5	L_1P_6	L_1P_7	L_1P_8	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>L_2P_1</td><td>L_2P_2</td><td>L_2P_3</td><td>L_2P_4</td><td>L_2P_5</td></tr> <tr><td>L_2P_6</td><td>L_1P_1</td><td>L_1P_2</td><td>L_1P_3</td><td>L_2P_7</td></tr> <tr><td>L_2P_8</td><td>L_1P_4</td><td style="background-color: #e0e0e0;">C</td><td>L_1P_5</td><td>L_2P_9</td></tr> <tr><td>L_2P_{10}</td><td>L_1P_6</td><td>L_1P_7</td><td>L_1P_8</td><td>L_2P_{11}</td></tr> <tr><td>L_2P_{12}</td><td>L_2P_{13}</td><td>L_2P_{14}</td><td>L_2P_{15}</td><td>L_2P_{16}</td></tr> </table>	L_2P_1	L_2P_2	L_2P_3	L_2P_4	L_2P_5	L_2P_6	L_1P_1	L_1P_2	L_1P_3	L_2P_7	L_2P_8	L_1P_4	C	L_1P_5	L_2P_9	L_2P_{10}	L_1P_6	L_1P_7	L_1P_8	L_2P_{11}	L_2P_{12}	L_2P_{13}	L_2P_{14}	L_2P_{15}	L_2P_{16}	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>L_3P_1</td><td>L_3P_2</td><td>L_3P_3</td><td>L_3P_4</td><td>L_3P_5</td><td>L_3P_6</td><td>L_3P_7</td></tr> <tr><td>L_3P_8</td><td>L_3P_9</td><td>L_3P_{10}</td><td>L_3P_{11}</td><td>L_3P_{12}</td><td>L_3P_{13}</td><td>L_3P_{14}</td></tr> <tr><td>L_3P_{15}</td><td>L_3P_{16}</td><td>L_3P_{17}</td><td>L_3P_{18}</td><td>L_3P_{19}</td><td>L_3P_{20}</td><td>L_3P_{21}</td></tr> <tr><td>L_3P_{22}</td><td>L_3P_{23}</td><td>L_3P_{24}</td><td style="background-color: #e0e0e0;">C</td><td>L_3P_{25}</td><td>L_3P_{26}</td><td>L_3P_{27}</td></tr> <tr><td>L_3P_{28}</td><td>L_3P_{29}</td><td>L_3P_{30}</td><td>L_3P_{31}</td><td>L_3P_{32}</td><td>L_3P_{33}</td><td>L_3P_{34}</td></tr> <tr><td>L_3P_{35}</td><td>L_3P_{36}</td><td>L_3P_{37}</td><td>L_3P_{38}</td><td>L_3P_{39}</td><td>L_3P_{40}</td><td>L_3P_{41}</td></tr> <tr><td>L_3P_{42}</td><td>L_3P_{43}</td><td>L_3P_{44}</td><td>L_3P_{45}</td><td>L_3P_{46}</td><td>L_3P_{47}</td><td>L_3P_{48}</td></tr> </table>	L_3P_1	L_3P_2	L_3P_3	L_3P_4	L_3P_5	L_3P_6	L_3P_7	L_3P_8	L_3P_9	L_3P_{10}	L_3P_{11}	L_3P_{12}	L_3P_{13}	L_3P_{14}	L_3P_{15}	L_3P_{16}	L_3P_{17}	L_3P_{18}	L_3P_{19}	L_3P_{20}	L_3P_{21}	L_3P_{22}	L_3P_{23}	L_3P_{24}	C	L_3P_{25}	L_3P_{26}	L_3P_{27}	L_3P_{28}	L_3P_{29}	L_3P_{30}	L_3P_{31}	L_3P_{32}	L_3P_{33}	L_3P_{34}	L_3P_{35}	L_3P_{36}	L_3P_{37}	L_3P_{38}	L_3P_{39}	L_3P_{40}	L_3P_{41}	L_3P_{42}	L_3P_{43}	L_3P_{44}	L_3P_{45}	L_3P_{46}	L_3P_{47}	L_3P_{48}
L_1P_1	L_1P_2	L_1P_3																																																																																			
L_1P_4	C	L_1P_5																																																																																			
L_1P_6	L_1P_7	L_1P_8																																																																																			
L_2P_1	L_2P_2	L_2P_3	L_2P_4	L_2P_5																																																																																	
L_2P_6	L_1P_1	L_1P_2	L_1P_3	L_2P_7																																																																																	
L_2P_8	L_1P_4	C	L_1P_5	L_2P_9																																																																																	
L_2P_{10}	L_1P_6	L_1P_7	L_1P_8	L_2P_{11}																																																																																	
L_2P_{12}	L_2P_{13}	L_2P_{14}	L_2P_{15}	L_2P_{16}																																																																																	
L_3P_1	L_3P_2	L_3P_3	L_3P_4	L_3P_5	L_3P_6	L_3P_7																																																																															
L_3P_8	L_3P_9	L_3P_{10}	L_3P_{11}	L_3P_{12}	L_3P_{13}	L_3P_{14}																																																																															
L_3P_{15}	L_3P_{16}	L_3P_{17}	L_3P_{18}	L_3P_{19}	L_3P_{20}	L_3P_{21}																																																																															
L_3P_{22}	L_3P_{23}	L_3P_{24}	C	L_3P_{25}	L_3P_{26}	L_3P_{27}																																																																															
L_3P_{28}	L_3P_{29}	L_3P_{30}	L_3P_{31}	L_3P_{32}	L_3P_{33}	L_3P_{34}																																																																															
L_3P_{35}	L_3P_{36}	L_3P_{37}	L_3P_{38}	L_3P_{39}	L_3P_{40}	L_3P_{41}																																																																															
L_3P_{42}	L_3P_{43}	L_3P_{44}	L_3P_{45}	L_3P_{46}	L_3P_{47}	L_3P_{48}																																																																															

شکل ۴. نحوه سطح‌بندی و توزیع پیکسل‌های هر سطح در الگوریتم تشخیص چند سطحی پیچیده (CMLSR)

در مرحله بعد، مقدار عددی هر پیکسل که در سطح L_i قرار گرفته با تمامی پیکسل‌هایی که در سطح بعدی یا L_{i+1} قرار گرفته به صورت زوجی مقایسه شده و در صورتی که دارای ارزش ارتفاعی (Z-value) بیشتری باشد به مقدار m یک واحد اضافه می‌شود رابطه ۳ این شرایط را به زبان ریاضی بیان می‌کند. در این رابطه؛ L تعداد سطوح واقع شده در یک پنجره متحرک با ابعاد r, c است و r, c هر دو اعدادی فرد و برابر هستند. PL_i مجموعه پیکسل‌هایی است که در سطح L_i قرار گرفته‌اند. برای محاسبه m تمامی حالاتی در نظر گرفته می‌شود که پیکسل‌های موجود در سطح L_i که با P_j نمایش داده می‌شوند، با تمامی پیکسل‌های موجود در سطح L_{i+1} که با P_{j+1} نمایش داده می‌شوند، به صورت دو به دو مقایسه شده و در صورتی که ارزش بیشتری داشته باشند به مقدار m یک واحد اضافه خواهد شد. n تعداد کل حالات ممکن در مقایسه دو به دو است. بدین منظور مجموع ضرب تعداد اعضای مجموعه L_i را که با $||L_i||$ نشان داده شده در تعداد اعضای مجموعه سطح بعدی یا L_{i+1} که با $||L_{i+1}||$ نمایش داده شده است محاسبه کرده و معادل n در نظر گرفته شد.

$$mw_{(r,c)} = \begin{cases} L = \frac{(mw_{(r,c)} - 1)}{2} | (r \bmod 2 \neq 0) \text{ and } (c \bmod 2 \neq 0), r = c & \text{رابطه ۳} \\ |P_{L_i}| = (i \times 8) \\ m = \sum_{i,j=1}^{|L_i|, |P_{L_i}|} L_i P_j > L_{i+1} P_{j+1} \\ n = \sum_{i=1}^L |L_i| \times |L_{i+1}| \end{cases}$$

الگوریتم تشخیص تک نقطه‌ای (SPSR)

در الگوریتم تشخیص تک نقطه‌ای سطح‌بندی وجود نداشته و تمامی پیکسل‌های موجود در پنجره متحرک mw با ابعاد سطر و ستونی r, c به طور زوجی مقایسه شده و در صورتی که ارزش پیکسل مرکزی مقدار ارتفاعی بیشتری را دارا باشد به مقدار m یک واحد اضافه خواهد شد. شکل ۵ نحوه توزیع پیکسل‌ها در الگوریتم تشخیص تک نقطه‌ای را نشان می‌دهد. الگوریتم تشخیص تک نقطه‌ای با استفاده از رابطه ۴ پیاده‌سازی و با نماد ریاضی نشان داده شده است.

$mw_{(r,c)} = 3 \times 3$	$mw_{(r,c)} = 5 \times 5$	$mw_{(r,c)} = 7 \times 7$																																																																																			
<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>P_1</td><td>P_2</td><td>P_3</td></tr> <tr><td>P_4</td><td style="background-color: #e0e0e0;">$P_5=C$</td><td>P_6</td></tr> <tr><td>P_7</td><td>P_8</td><td>P_9</td></tr> </table>	P_1	P_2	P_3	P_4	$P_5=C$	P_6	P_7	P_8	P_9	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>P_1</td><td>P_2</td><td>P_3</td><td>P_4</td><td>P_5</td></tr> <tr><td>P_6</td><td>P_7</td><td>P_8</td><td>P_9</td><td>P_{10}</td></tr> <tr><td>P_{11}</td><td>P_{12}</td><td style="background-color: #e0e0e0;">$P_{13}=C$</td><td>P_{14}</td><td>P_{15}</td></tr> <tr><td>P_{16}</td><td>P_{17}</td><td>P_{18}</td><td>P_{19}</td><td>P_{20}</td></tr> <tr><td>P_{21}</td><td>P_{22}</td><td>P_{23}</td><td>P_{24}</td><td>P_{25}</td></tr> </table>	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7	P_8	P_9	P_{10}	P_{11}	P_{12}	$P_{13}=C$	P_{14}	P_{15}	P_{16}	P_{17}	P_{18}	P_{19}	P_{20}	P_{21}	P_{22}	P_{23}	P_{24}	P_{25}	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>P_1</td><td>P_2</td><td>P_3</td><td>P_4</td><td>P_5</td><td>P_6</td><td>P_7</td></tr> <tr><td>P_8</td><td>P_9</td><td>P_{10}</td><td>P_{11}</td><td>P_{12}</td><td>P_{13}</td><td>P_{14}</td></tr> <tr><td>P_{15}</td><td>P_{16}</td><td>P_{17}</td><td>P_{18}</td><td>P_{19}</td><td>P_{20}</td><td>P_{21}</td></tr> <tr><td>P_{22}</td><td>P_{23}</td><td>P_{24}</td><td style="background-color: #e0e0e0;">$P_{25}=C$</td><td>P_{26}</td><td>P_{27}</td><td>P_{28}</td></tr> <tr><td>P_1</td><td>P_1</td><td>P_1</td><td>P_1</td><td>P_1</td><td>P_1</td><td>P_1</td></tr> <tr><td>P_1</td><td>P_1</td><td>P_1</td><td>P_1</td><td>P_1</td><td>P_1</td><td>P_1</td></tr> <tr><td>P_1</td><td>P_1</td><td>P_1</td><td>P_1</td><td>P_1</td><td>P_1</td><td>P_1</td></tr> </table>	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7	P_8	P_9	P_{10}	P_{11}	P_{12}	P_{13}	P_{14}	P_{15}	P_{16}	P_{17}	P_{18}	P_{19}	P_{20}	P_{21}	P_{22}	P_{23}	P_{24}	$P_{25}=C$	P_{26}	P_{27}	P_{28}	P_1	P_1	P_1	P_1	P_1	P_1	P_1	P_1	P_1	P_1	P_1	P_1	P_1	P_1	P_1	P_1	P_1	P_1	P_1	P_1	P_1
P_1	P_2	P_3																																																																																			
P_4	$P_5=C$	P_6																																																																																			
P_7	P_8	P_9																																																																																			
P_1	P_2	P_3	P_4	P_5																																																																																	
P_6	P_7	P_8	P_9	P_{10}																																																																																	
P_{11}	P_{12}	$P_{13}=C$	P_{14}	P_{15}																																																																																	
P_{16}	P_{17}	P_{18}	P_{19}	P_{20}																																																																																	
P_{21}	P_{22}	P_{23}	P_{24}	P_{25}																																																																																	
P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7																																																																															
P_8	P_9	P_{10}	P_{11}	P_{12}	P_{13}	P_{14}																																																																															
P_{15}	P_{16}	P_{17}	P_{18}	P_{19}	P_{20}	P_{21}																																																																															
P_{22}	P_{23}	P_{24}	$P_{25}=C$	P_{26}	P_{27}	P_{28}																																																																															
P_1	P_1	P_1	P_1	P_1	P_1	P_1																																																																															
P_1	P_1	P_1	P_1	P_1	P_1	P_1																																																																															
P_1	P_1	P_1	P_1	P_1	P_1	P_1																																																																															

شکل ۵. نحوه سطح‌بندی و توزیع پیکسل‌های هر سطح در الگوریتم تشخیص تک نقطه‌ای (SPSR)

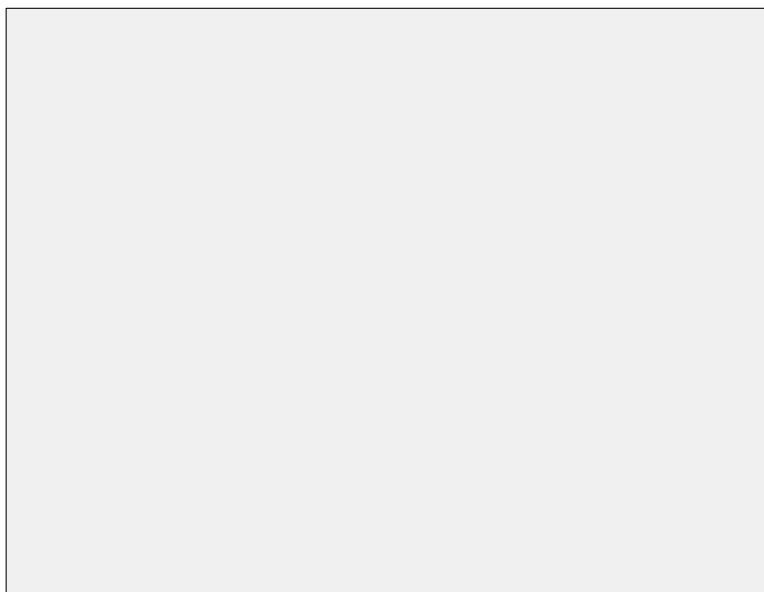
در این رابطه در صورتی که ارزش ارتفاعی پیکسل مرکزی (C) در هر زوج مقایسه بیشتر از ارزش ارتفاعی سایر پیکسل‌های پنجره متحرک $mw(r,c)$ با ابعاد سطر و ستونی (r,c) باشد، یک واحد به مقدار m اضافه می‌شود. تعداد کل حالات مقایسه‌ای محتمل (n) برابر با ضرب تعداد سطر و ستون پنجره متحرک منهای یک واحد است.

$$mw_{(r,c)} = \begin{cases} m = \sum_{i=1}^n C > P_i \\ n = (r \times c) - 1 \end{cases} \quad \text{رابطه ۴}$$

بحث و یافته‌ها

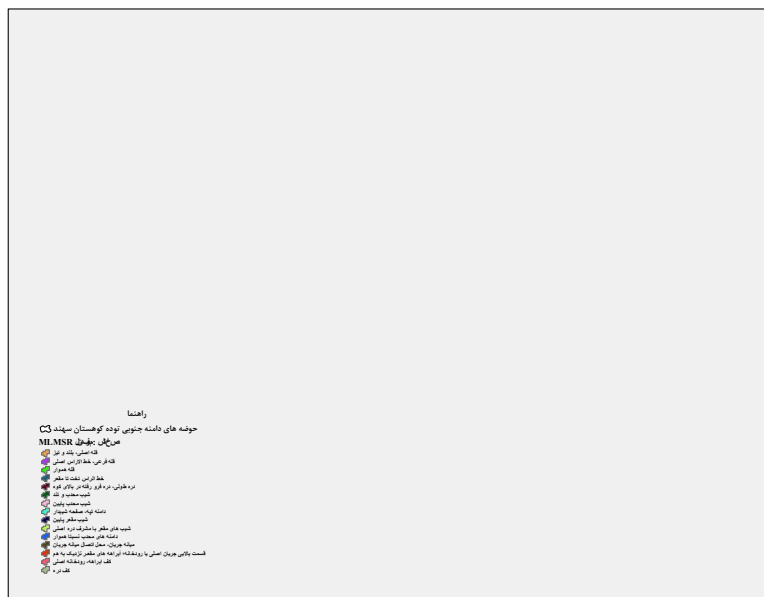
در این پژوهش برای طبقه‌بندی و تفکیک لندفرم‌های حوضه‌های دامنه جنوبی توده کوهستان سهند (قلعه چای، صوفی چای، مردق چای، لیلان چای و بخشی از قرنقو) از شاخص موقعیت توپوگرافی با استفاده از مدل رقومی ارتفاع با قدرت تفکیک ۳۰ متر (srtm) استفاده شد. براساس این شاخص تعداد ۱۰ نوع لندفرم در حوضه‌های مورد مطالعه شناسایی شد. هر کدام از لندفرم‌های طبقه‌بندی شده بخشی از منطقه را در بر می‌گیرند. نقشه لندفرم منطقه مورد مطالعه بر اساس شاخص (TPI) در شکل (۶) داده شده است. این نقشه با استفاده از شاخص (TPI) (Topographic Position Index) لندفرم‌های مختلف دامنه‌های جنوبی سهند را شناسایی و تقسیم‌بندی کرده است. شاخص TPI به دلیل توانایی در تحلیل موقعیت توپوگرافی و شناسایی اشکال مختلف زمین، ابزاری مؤثر در مطالعات ژئومورفولوژی است.

دره‌های باریک و آبراهه‌ها، این نوع دره‌ها عمدتاً در مناطق شیب‌دار و کوهستانی مشاهده می‌شوند و نشان‌دهنده‌ی فعالیت‌های فرسایشی شدید آب هستند. در نقشه، این دره‌ها با رنگ آبی تیره مشخص شده‌اند و همانطور که مشاهده می‌شود در بخش‌های شمالی و شرقی منطقه متمرکز هستند. زهکش‌های شیب میانی و دره‌های کم عمق، این نوع دره‌ها در مناطق با شیب متوسط و کم شیب‌تر از دره‌های باریک یافت می‌شوند. در نقشه، با رنگ آبی روشن نشان داده شده‌اند که در بخش‌های مرکزی و جنوبی منطقه بیشتر باشند. زهکش‌های مناطق مرتفع، این نوع زهکش‌ها در ارتفاعات بالاتر قرار دارند و معمولاً دارای شیب تند هستند. که در نقشه، با رنگ سبز تیره نشان داده شده‌اند و در نواحی کوهستانی شمال و شرق منطقه بیشتر مشاهده می‌شوند. دره‌های با شکل U، این نوع دره‌ها به دلیل فرسایش آب در مناطق کوهستانی ایجاد می‌شوند و معمولاً دارای دیواره‌های تند و کف باریک هستند. در نقشه، با رنگ سبز روشن نشان داده شده‌اند و در نواحی کوهستانی متمرکز هستند. دشت‌ها، مناطق مسطحی هستند که در اثر رسوب‌گذاری مواد حمل شده توسط آب و باد ایجاد می‌شوند. در نقشه، با رنگ زرد نشان داده شده‌اند و در بخش‌های مرکزی و جنوبی منطقه مشاهده می‌شوند. دشت سر، مناطق پست و همواری هستند که در مجاورت کوه‌ها قرار دارند و معمولاً توسط رسوبات آبرفتی پوشیده شده‌اند. در نقشه، با رنگ نارنجی نشان داده شده‌اند و در حاشیه کوه‌ها و دره‌ها مشاهده می‌شوند. فلات‌های بالایی، مناطق مسطحی هستند که در ارتفاعات بالا قرار دارند. در نقشه، با رنگ قرمز نشان داده شده‌اند و در نواحی کوهستانی شمال و شرق منطقه مشاهده می‌شوند. خط‌الراس‌های مرتفع، خطوطی هستند که ارتفاعات بالاتر از یک حد مشخص را نشان می‌دهند. در نقشه (شکل ۶)، با خطوط قهوه‌ای رنگ مشخص شده‌اند. تپه‌های کوچک موجود در دشت، تپه‌های کوچکی هستند که در داخل دشت‌ها قرار دارند و معمولاً بر اثر فرسایش بادی یا آبی ایجاد می‌شوند. در نقشه، با رنگ بنفش نشان داده شده‌اند و در برخی از دشت‌ها مشاهده می‌شوند. با توجه به تحلیل انجام شده، می‌توان گفت که توزیع لندفرم‌ها در منطقه مورد مطالعه تحت تأثیر عوامل مختلفی از جمله توپوگرافی، زمین‌شناسی، آب و هوا و فعالیت‌های تکتونیک قرار دارد. مناطق کوهستانی دارای تنوع لندفرمی بالاتری نسبت به مناطق دشتی هستند و در این مناطق دره‌های باریک، زهکش‌های مناطق مرتفع و فلات‌های بالایی غالب هستند. در مناطق دشتی، دشت‌ها و دشت سرها بیشتر مشاهده می‌شوند. تحلیل نقشه لندفرم‌ها می‌تواند اطلاعات ارزشمندی در مورد ویژگی‌های فیزیوگرافی منطقه، پتانسیل‌های استفاده از زمین و مخاطرات طبیعی ارائه دهد. با انجام مطالعات دقیق‌تر و جامع‌تر می‌توان از این اطلاعات برای برنامه‌ریزی و مدیریت پایدار منابع طبیعی استفاده کرد. همچنین این داده‌ها می‌توانند به‌عنوان مرجع برای مدیریت پایدار منابع طبیعی و برنامه‌ریزی منطقه‌ای استفاده شوند.



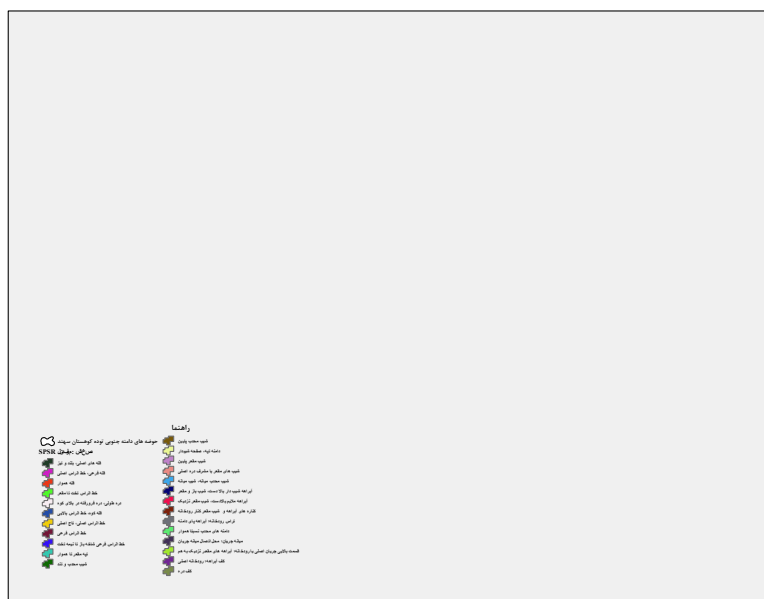
شکل ۶. نقشه طبقه‌بندی لندفرم‌ها با استفاده از شاخص TPI

الگوریتم اولی که در این پژوهش استفاده شد، MLMSR (Multi-Layered Morphological Spatial Representation) است که در شکل (۷) مشاهده می‌شود. توزیع لندفرم‌ها به صورت پراکنده و با الگوی مشخصی در منطقه مشاهده می‌شود. این الگو احتمالاً تحت تاثیر عوامل مختلفی مانند شیب، جهت شیب، نوع زمین‌شناسی، فعالیت‌های تکتونیکی و فرسایش قرار گرفته است. لندفرم‌های مختلف به طور معمول با توپوگرافی منطقه ارتباط مستقیمی دارند. به عنوان مثال، لندفرم‌های شیب‌دار در دامنه‌های کوهستانی و لندفرم‌های هموارتر در دشت‌ها مشاهده می‌شوند. لندفرم‌های شیب‌دار که معمولاً رنگ‌های سبز و زرد در نقشه نشان‌دهنده لندفرم‌های شیب‌دار و دامنه‌های کوهستانی هستند. این لندفرم‌ها در بخش‌های بالایی حوضه و در اطراف قله سه‌په‌سند متمرکز شده‌اند. لندفرم‌های هموار رنگ‌های نارنجی و قهوه‌ای نشان‌دهنده لندفرم‌های هموارتر مانند دشت‌ها و آبرفت‌ها باشند. این لندفرم‌ها بیشتر در قسمت‌های پایین حوضه و در مجاورت دریاچه ارومیه مشاهده می‌شوند. لندفرم‌های پیچیده که با رنگ‌های بنفش و آبی نشان‌دهنده لندفرم‌های پیچیده‌تری مانند تپه‌ها، دره‌ها و آبراهه‌ها هستند. این لندفرم‌ها در سراسر حوضه پراکنده شده‌اند و نشان‌دهنده فعالیت‌های فرسایشی در منطقه هستند. بر اساس تحلیل‌های بالا، می‌توان گفت که دامنه‌های جنوبی سه‌په‌سند دارای تنوع لندفرمی بالایی است. این تنوع نتیجه‌ی تعامل پیچیده بین عوامل مختلف زمین‌شناسی و مورفولوژیکی است. لندفرم‌های شیب‌دار، هموار و پیچیده در این منطقه به صورت مشخصی قابل تشخیص هستند.



شکل ۷. نقشه طبقه‌بندی لندفرم‌ها با استفاده از الگوریتم MLMSR

الگوریتم دوم که در این پژوهش استفاده شد، CMLSR (Complex Multi-Level Summit Recognition) است که در شکل (۸) نقشه خروجی این الگوریتم مشاهده می‌شود. تنوع لندفرم‌های نقشه نشان می‌دهد که دامنه جنوبی سه‌پند دارای تنوع بالایی از لندفرم‌ها است. که در بخش قبلی اشاره شد که این تنوع می‌تواند ناشی از عوامل مختلفی مانند زمین شناسی، شیب، ارتفاع، فعالیت‌های تکتونیکی و فرسایش باشد. همچنین توزیع لندفرم‌ها و پراکندگی لندفرم‌ها در نقشه به صورت تصادفی نیست و الگوهای مشخصی را نشان می‌دهد. برخی لندفرم‌ها مانند شیب‌های محدب و مقعر در مناطق وسیعی از دامنه توزیع شده‌اند، در حالی که برخی دیگر مانند قله‌ها و خط‌الراس‌ها در مناطق محدودتری مشاهده می‌شوند. همچنین لندفرم‌ها با توپوگرافی موجود در منطقه به طور مستقیم در ارتباط هستند؛ که به عنوان مثال، قله‌ها و خط‌الراس‌ها در نقاط مرتفع‌تر قرار دارند، در حالی که دره‌ها و آبراهه‌ها در مناطق پست‌تر واقع شده‌اند. شیب‌های محدب و به وفور در دامنه جنوبی سه‌پند دیده می‌شوند و نشان‌دهنده تغییرات شیب در دامنه هستند. شیب‌های محدب معمولاً در قسمت‌های بالایی دامنه و شیب‌های مقعر در قسمت‌های پایینی آن مشاهده می‌شوند. دامنه‌های تپه، صفحه‌های شیبدار و شیب‌های محدب نیز در مناطق وسیعی از دامنه توزیع شده‌اند و نشان‌دهنده تنوع شیب و شکل دامنه‌ها هستند. قله‌ها، خط‌الراس‌ها و دره‌ها در نقشه قابل مشاهده هستند، اما نسبت به شیب‌ها و دامنه‌ها فراوانی کمتری دارند. قله‌ها و خط‌الراس‌ها معمولاً در قسمت‌های مرکزی و شمالی دامنه قرار دارند، در حالی که دره‌ها در قسمت‌های جنوبی‌تر مشاهده می‌شوند.



شکل ۹. نقشه طبقه‌بندی لندفرم‌ها با استفاده از الگوریتم SPSR



شکل ۱۰. مطالعات میدانی نگارنده

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، شاخص موقعیت توپوگرافی (TPI) در کنار سه الگوریتم MLMSR، CMLSR و SPSR برای طبقه‌بندی و تفکیک لندفرم‌های دامنه جنوبی توده کوهستان سهند استفاده شده است. در ادامه، این چهار روش با یکدیگر مقایسه شده‌اند. شاخص (Topographic Position Index) TPI بر مبنای اختلاف ارتفاع هر پیکسل نسبت به میانگین ارتفاع همسایگی خود محاسبه می‌شود. این شاخص به خوبی قادر به تفکیک مناطق فرورفته (مانند دره‌ها) و برجسته (مانند تپه‌ها و فلات‌ها) است. دقت شناسایی لندفرم‌ها وابسته به مقیاس تحلیل است؛ در مقیاس‌های بزرگ، TPI قادر به تفکیک کلی انواع لندفرم‌ها است، اما در مقیاس‌های کوچک، ممکن است برخی جزئیات را از دست بدهد. نقشه‌های تولید شده با این روش به دلیل وابستگی به مدل رقومی ارتفاع (DEM) از دقت مکانی بالایی برخوردارند، اما در مناطق با توپوگرافی پیچیده، ممکن است همپوشانی‌هایی در تفکیک لندفرم‌ها ایجاد کند. این شاخص در شناسایی دره‌ها، زهکش‌های شیب‌دار و مناطق مرتفع عملکرد مناسبی دارد، اما تفکیک بین لندفرم‌های هموار و شیب‌های ملایم چالش‌برانگیز است. تمرکز الگوریتم MLMSR بر شناسایی لندفرم‌ها بر اساس پردازش چندلایه‌ای مورفولوژیکی است. برخلاف TPI که عمدتاً مبتنی بر اختلاف ارتفاع نسبی است، MLMSR از ویژگی‌های مورفومتریک متعددی برای تفکیک لندفرم‌ها استفاده می‌کند. دقت بالاتری در تفکیک لندفرم‌های شیب‌دار و دامنه‌های کوهستانی دارد، اما در شناسایی آبراهه‌ها و مسیرهای زهکشی، عملکرد آن نسبت به SPSR ضعیف‌تر است. الگوریتم CMLSR در تشخیص لندفرم‌های پیچیده و چندسطحی مانند قله‌ها، خط‌الرأس‌ها و شیب‌های محدب و مقعر عملکرد بهتری دارد. در مقایسه با TPI، این الگوریتم قادر به تفکیک

بهتر نواحی با تغییرات توپوگرافی نامنظم و پیچیده است. برتری CMLSR نسبت به TPI در تفکیک دقیق تر ساختارهای توپوگرافی پیچیده (مانند قله‌ها و شیب‌های ترکیبی) است. با این حال، این الگوریتم در شناسایی دشت‌ها و نواحی هموار عملکرد ضعیف‌تری نسبت به TPI دارد. الگوریتم SPSR بر شناسایی قله‌های منفرد و نواحی مرتفع متمرکز است و دقت بالایی در این زمینه دارد. در مقایسه با TPI، SPSR قادر به تفکیک بهتر مناطق مرتفع از مناطق با شیب متوسط و زیاد است. SPSR در شناسایی مسیرهای آبراهه‌ای، زهکش‌ها و نواحی شیب‌دار عملکرد ضعیف‌تری دارد، در حالی که TPI در این بخش‌ها کارایی بهتری دارد. اگرچه SPSR مناطق مرتفع را به خوبی شناسایی می‌کند، اما در تشخیص تفاوت‌های جزئی در لندفرم‌های با شیب متوسط، TPI عملکرد بهتری دارد.

جدول ۲. مقایسه نهایی مزایا و معایب هر روش

SPSR	CMLSR	MLMSR	TPI	ویژگی‌ها
پایین	متوسط	متوسط	بالا	دقت در تشخیص دره‌ها و زهکش‌ها
بسیار بالا	بسیار بالا	بالا	متوسط	دقت در تفکیک نواحی مرتفع و قله‌ها
پایین	بسیار بالا	بالا	متوسط	توانایی تشخیص شیب‌های محدب و مقعر
متوسط	بسیار بالا	بالا	پایین	تحلیل لندفرم‌های پیچیده
متوسط	پایین	متوسط	بالا	دقت در تفکیک مناطق هموار و دشت‌ها
کم	متوسط	کم	زیاد	وابستگی به مقیاس مکانی
بالا	پایین	متوسط	بالا	دقت در تفکیک آبراهه‌ها و زهکش‌های سطحی

این پژوهش با تمرکز بر استخراج، تحلیل و طبقه‌بندی لندفرم‌های دامنه جنوبی توده کوهستان سهندبا استفاده از شاخص موقعیت توپوگرافی (TPI) و سه الگوریتم پیشرفته CMLSR، MLMSR و SPSR پرداخته است. نتایج نشان داد که منطقه مورد مطالعه به دلیل شرایط توپوگرافی و زمین‌شناسی متنوع، از لندفرم‌های گوناگونی مانند دره‌های باریک، دشت‌های مسطح، تپه‌ها، خط‌الراس‌ها و فلات‌های بالایی تشکیل شده است. هر یک از این لندفرم‌ها ویژگی‌های منحصر به فردی دارند و توزیع آن‌ها در منطقه تحت تأثیر عواملی مانند شیب، جهت شیب، ارتفاع، نوع سنگ‌شناسی و فعالیت‌های تکتونیکی قرار دارد. در نواحی کوهستانی و شیب‌دار، دره‌های باریک و زهکش‌های مرتفع بیشترین تمرکز را داشته و این مناطق نشان‌دهنده فعالیت‌های شدید فرسایشی هستند. در مقابل، دشت‌ها و مناطق مسطح در بخش‌های پایین دست و حاشیه‌ای، به دلیل فرایندهای رسوب‌گذاری گسترده، شکل گرفته‌اند. همچنین، تپه‌ها و فلات‌های بالایی در ارتفاعات متوسط و بالا دیده می‌شوند که نشان‌دهنده تأثیر فرسایش باد و آب بر شکل‌گیری این لندفرم‌ها است. الگوریتم‌های مورد استفاده در این پژوهش، هر کدام قابلیت‌های متفاوتی در شناسایی و تحلیل لندفرم‌ها ارائه دادند. الگوریتم MLMSR به دلیل توانایی بالا در شناسایی اشکال پیچیده مانند قله‌ها و خط‌الراس‌ها عملکرد بهتری از خود نشان داد. در مقابل، الگوریتم SPSR به دلیل دقت بالا در پردازش پیکسل‌ها برای مناطق هموار و دشت‌ها مناسب‌تر بود. الگوریتم CMLSR نیز توانایی تحلیل لندفرم‌ها در مقیاس‌های مختلف را فراهم کرد و امکان استخراج جزئیات بیشتری از ساختارهای زمین را مهیا ساخت. در این پژوهش، از داده‌های مدل رقومی ارتفاع (DEM) با دقت ۳۰ متر برای تحلیل موقعیت‌های توپوگرافی استفاده شد. این داده‌ها به دلیل دقت و جزئیات بالا، امکان تحلیل سریع و اتوماتیک لندفرم‌ها را فراهم کرده و می‌توانند در سایر مناطق مشابه نیز به کار گرفته شوند. تحلیل‌های انجام شده نشان داد که شاخص TPI به عنوان یک ابزار مؤثر در تفکیک و طبقه‌بندی اشکال زمین، قابلیت‌های بالایی در مطالعات ژئومورفولوژی دارد.

این پژوهش اطلاعات ارزشمندی درباره تنوع و توزیع لندفرم‌ها در منطقه ارائه داد، که به برنامه‌ریزی پایدار منطقه‌ای کمک می‌کند. اطلاعات حاصل از این مطالعه می‌تواند برای مدیریت منابع طبیعی، کاهش خطرات طبیعی مانند سیلاب‌ها، توسعه زیرساخت‌های گردشگری، و ارتقای ژئوتوریسم به کار گرفته شود.

منابع

- رعیتی شوازی، م.، کرم، ا.، غفاریان مالمیری، ح. ر. و سپهر، ع.، ۱۳۹۵. مقایسه کارایی برخی الگوریتم‌های طبقه‌بندی در مطالعه تغییرات لندفرم‌های بیابانی دشت یزد اردکان، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، ۶(۱): ۷۳-۵۷.
- شکار بادی، ع.، امیر احمدی، ا.، مختاری، ل. گ. و جمال آبادی، ج.، ۱۴۰۲. طبقه‌بندی خودکار لندفرم‌ها (ACL) با دو مدل ویژگی‌های زمین (TA) و شاخص موقعیت توپوگرافی (TPI) در دامنه‌های شمال شرقی ارتفاعات کرکس کوه نطنز و کاشان، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، ۱۲(۲): ۱۶۵-۱۴۸.
- عابدینی، م.، ۱۳۹۵. ژئومورفولوژی تکتونیکی (جلد اول)، چاپ اول، نشر دانشگاه محقق اردبیلی، صص ۲۹۲.
- عابدینی، م.، مظفری، ح. و فعال‌نذیری، م.، ۱۴۰۲. طبقه‌بندی و آشکارسازی تغییرات لندفرم‌های ژئومورفولوژی و شبیه‌سازی تغییرات با سلول‌های خودکار مارکوف (مطالعه موردی: حوضه آبریز سجارود)، ژئومورفولوژی کمی، ۱۱(۴): ۱۳۰-۱۰۹.
- گنجعلی، ج.، حلبیان، ا. ح.، کرم، ا. و حجه فروش‌نیا، ش.، ۱۴۰۱. بررسی تغییرات شوری خاک در ارتباط با لندفرم‌های نواحی بیابانی شمال استان اصفهان، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، ۱۱(۳): ۲۵۳-۲۲۰.
- مکرم، م.، درویشی بلورانی، ع. و نگهبان، س.، ۱۳۹۴. ارتباط ویژگی‌های مورفومتری حوضه‌های آبخیز و فرسایش‌پذیری در سطوح مختلف ارتفاعی با استفاده از شاخص موقعیت توپوگرافی (TPI) مطالعه موردی: حوضه آبخیز نازلوچای، فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی، ۲۶(۱۰۱): ۱۴۲-۱۳۱.
- ملکی، امجد، مارابی، ه. و رحیمی، ح.، ۱۳۹۵. ارزیابی شاخص موقعیت توپوگرافی (TPI) در زون سهند - سیرجان - زاگرس شکسته، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، ۵(۱): ۱۴۱-۱۲۹.
- نگهبان، س. و مکرم، م.، ۱۴۰۳. ارتباط طبقه‌بندی شکل زمین، کاربری اراضی و مناطق دارای پتانسیل سیل خیزی در استان بوشهر، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، ۱۳(۱): ۷۹-۶۴.
- Anders, N. S., Seijmonsbergen, A. C., & Bouten, W. (2013). Geomorphological change detection using Object-Based feature extraction from Multi-Temporal LiDAR data. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 10(6), 1587–1591. <https://doi.org/10.1109/lgrs.2013.2262317>
- Baatz, M. (2000). Multiresolution Segmentation-an optimization approach for high quality multi-scale image segmentation. *N Angewandte Geographische Informationsverarbeitung*. <https://ci.nii.ac.jp/naid/10019600673>
- Benz, U. C., Hofmann, P., Willhauck, G., Lingenfelder, I., & Heynen, M. (2003). Multi-resolution, object-oriented fuzzy analysis of remote sensing data for GIS-ready information. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 58(3–4), 239–258. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2003.10.002>
- Blaschke, T., & Strobl, J. (2001). What's wrong with pixels? Some recent developments interfacing remote sensing and GIS. *GIS – Zeitschrift Für Geoinformations Systeme*, 6, 12–17. <https://ci.nii.ac.jp/naid/10027626746/>
- Camargo, F., Almeida, C., Florenzano, T., Heipke, C., Feitosa, R., & Costa, G. (2011). ASTER/TERRA Imagery and a multilevel semantic network for semi-automated classification of landforms in a subtropical area. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 77(6), 619–629. <https://doi.org/10.14358/pers.77.6.619>
- Drăguț, L., & Eisank, C. (2011). Object representations at multiple scales from digital elevation models. *Geomorphology*, 129(3–4), 183–189. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.03.003>

- Dutta, S., Mahato, F & Gupta, F. (2024). Topographical Position Index Based Terrain Classification and Its Impact on Land Use and Land Cover on Ajodhya Hills Region, (Chotanagpur Plateau) India. *Colombo Geographer*, Volume 2, Issue I.1-16.
- Etzelmüller, B., Ødegård, R. S., Berthling, I., & Sollid, J. L. (2001). Terrain parameters and remote sensing data in the analysis of permafrost distribution and periglacial processes: principles and examples from southern Norway. *Permafrost and Periglacial Processes*, 12(1), 79–92. <https://doi.org/10.1002/ppp.384>
- Gupta, L., & Dixit, J. (2024). Investigating the spatial distribution of flood inundation and landforms using topographic position index (TPI) and geomorphon-based automated landform classification methods. *Journal of Earth System Science*, 133(3). <https://doi.org/10.1007/s12040-024-02343-x>
- Jenness, J. (2006). Topographic Position Index (tpi jen.avx) extension for ArcView 3.x, v. 1.2. *Jenness Enterprises*. Available at: <http://www.jennessent.com/arcview/tpi.htm>.
- Lang, S. (2008). Object-based image analysis for remote sensing applications: modeling reality – dealing with complexity. In *Lecture notes in geoinformation and cartography* (pp. 3–27). https://doi.org/10.1007/978-3-540-77058-9_1
- Liu, N. X. (2008). Airborne LiDAR for DEM generation: some critical issues. *Progress in Physical Geography Earth and Environment*, 32(1), 31–49. <https://doi.org/10.1177/0309133308089496>
- MacMillan, R., Jones, R., & McNabb, D. H. (2003). Defining a hierarchy of spatial entities for environmental analysis and modeling using digital elevation models (DEMs). *Computers Environment and Urban Systems*, 28(3), 175–200. [https://doi.org/10.1016/s0198-9715\(03\)00019-x](https://doi.org/10.1016/s0198-9715(03)00019-x)
- Martínez-Graña, A., Boski, T., Goy, J., Zazo, C., & Dabrio, C. (2016). Coastal-flood risk management in central Algarve: *Vulnerability and flood risk indices* (South Portugal). *Ecological Indicators*, 71, 302–316. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.07.021>
- Minár, J., & Evans, I. S. (2007). Elementary forms for land surface segmentation: The theoretical basis of terrain analysis and geomorphological mapping. *Geomorphology*, 95(3–4), 236–259. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2007.06.003>
- Mitasova, H., Overton, M. F., Recalde, J. J., Bernstein, D. J., & Freeman, C. W. (2009). Raster-Based Analysis of Coastal Terrain Dynamics from Multitemporal Lidar Data. *Journal of Coastal Research*, 25(2), 507–514. <https://doi.org/10.2112/07-0976.1>
- Romstad, B., & Etzelmüller, B. (2011). Mean-curvature watersheds: A simple method for segmentation of a digital elevation model into terrain units. *Geomorphology*, 139–140, 293–302. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.10.031>
- Sharma, M., Garg, R. D., Badenko, V., Fedotov, A., Min, L., & Yao, A. (2020). Potential of airborne LiDAR data for terrain parameters extraction. *Quaternary International*, 575–576, 317–327. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2020.07.039>
- Smith, M. J., Chandler, J., & Rose, J. (2008). High spatial resolution data acquisition for the geosciences: kite aerial photography. *Earth Surface Processes and Landforms*, 34(1), 155–161. <https://doi.org/10.1002/esp.1702>
- Štular, B., Lozić, E., & Eichert, S. (2021). Airborne LIDAR-Derived Digital Elevation Model for Archaeology. *Remote Sensing*, 13(9), 1855. <https://doi.org/10.3390/rs13091855>
- Valkanou, K., Karymbalis, E., & Tsanakas, K. (2024). Identification of geomorphic and morphotectonic features using geographic information system techniques. In *Elsevier eBooks* 3–28. <https://doi.org/10.1016/b978-0-443-13605-4.00009-6>
- Ventura, G., Vilardo, G., Terranova, C., & Sessa, E. B. (2011). Tracking and evolution of complex active landslides by multi-temporal airborne LiDAR data: The Montaguto landslide (Southern Italy). *Remote Sensing of Environment*, 115(12), 3237–3248. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.07.007>

- Weiss A. (2001). Topographic position and landforms analysis. *ERSI User Conference*, San Diego, USA.
- Yan, W. Y., Shaker, A., & El-Ashmawy, N. (2014). Urban land cover classification using airborne LiDAR data: A review. *Remote Sensing of Environment*, 158, 295–310. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.11.001>